

УДК 626.823.92:532.291.001.2

**Е. И. Шкуланов, Г. Л. Лобанов** (ФГБНУ «РосНИИПМ»)

## **ИССЛЕДОВАНИЯ СТАБИЛИЗАТОРОВ УРОВНЯ ВОДЫ ДЛЯ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

В статье приводятся лабораторные исследования водовыпусков со стабилизатором уровня воды конструкции Кубаньгипроводхоза. Исследования проводились на пространственной крупномасштабной модели (М 1:2; 1:3) с использованием методов теории математического планирования эксперимента. Получены оптимальные размеры входной воронки, обеспечивающей работу сооружения в устойчивом напорном режиме и при минимальном коэффициенте сопротивления на входе. Конструкция внедрена на орошаемом участке в Республике Адыгея и показала надежность и простоту в эксплуатации, точность поддержания уровня воды  $\pm 2$  см.

Ключевые слова: стабилизатор, оросительная система, уровень воды, пропускная способность, напор, сооружение.

**E. I. Shkulanov, G. L. Lobanov**

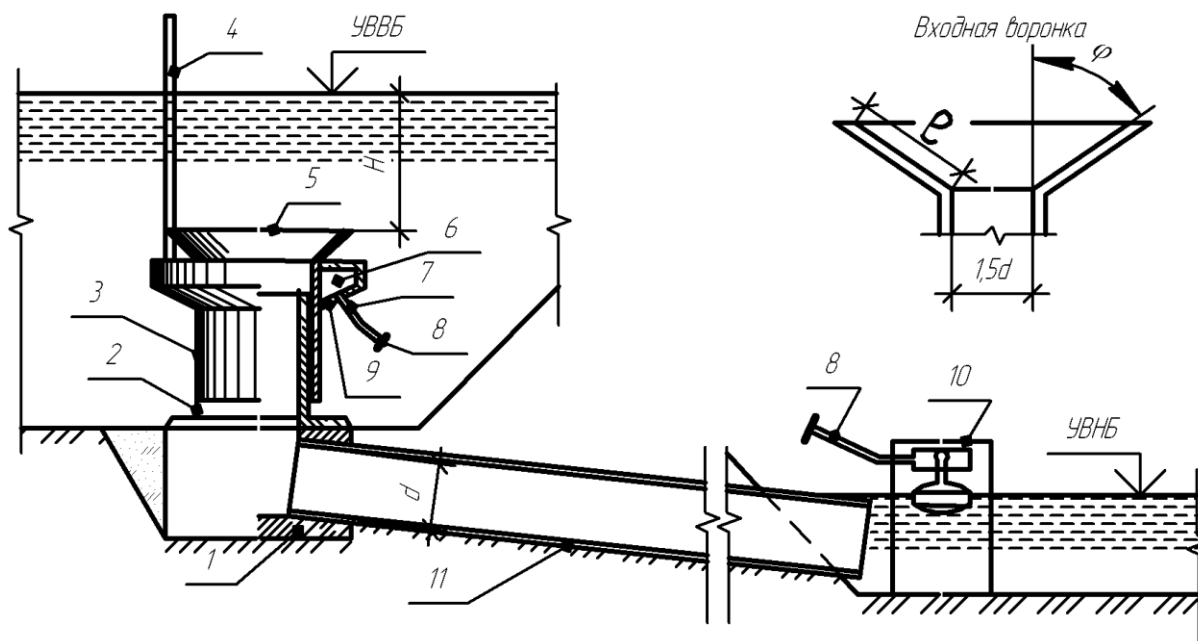
## **RESEARCHES FOR WATER LEVEL STABILIZERS FOR IRRIGATION SYSTEMS**

The article presents laboratory studies culverts with stabilizer water level of Kubangi-provodhoz's design. The studies were conducted on a large scale spatial model (M 1:3) using the methods of the theory of mathematical experiment planning. Optimal size of the input hopper, which provides job facilities in a sustainable mode of the pressure and with minimal resistance coefficient at the input, was obtained. The design implemented in the irrigated area in the Republic of Adygea and demonstrated reliability and ease of use, accurate maintenance of the water level  $\pm 2$  cm.

Key words: stabilizer, irrigation system, water level, capacity, pressure, structure

Специалистами ФГБНУ «РосНИИПМ» были выполнены исследования типового трубчатого водовыпуска (рисунок 1), оборудованного стабилизатором уровня воды (цилиндрический затвор-автомат) конструкции Кубаньгипроводхоза.

Сооружения состоят из входного оголовка с цилиндрическим стабилизатором уровня гидравлического действия, водопроводящей части из асбестоцементных труб диаметром 200, 300 мм, выходной части и рассчитаны на пропуск расчетных расходов воды 70-200 л/с в напорном гидравлическом режиме и гидравлических перепадах до 1,0 м.



- 1 – железобетонный блок ОГ-30, ОГ-20; 2 – корпус затвора; 3 – подвижный цилиндр;  
4 – воздушный патрубок; 5 – входная воронка; 6 – поплавок; 7 – опорожняющее устройство; 8 – гибкий трубопровод; 9 – заливное отверстие; 10 – датчик нижнего бьефа; 11 – асбестоцементная труба  $D = 200, 300$  мм

**Рисунок 1 – Схема трубчатого сооружения со стабилизатором уровня воды конструкции Кубаньгипроводхоза**

Стабилизатор состоит из регулятора непрямого действия и предназначен для поддержания заданного уровня воды в нижнем бьефе. Принцип работы затвора основан на пригрузке поплавка цилиндрического затвора водой и его опорожнении через входное и выходное отверстия. Выходное отверстие регулируется клапаном, соединенным с датчиком уровня нижнего бьефа. При проектировании сооружений необходимы расчеты его пропускной способности и глубины воды на входе. Поэтому при исследовании были поставлены следующие задачи: определение минимально допустимой глубины воды  $H$  над входной частью стабилизатора уровня, обеспечивающей работу сооружения в расчетном напорном режиме и определение величины коэффициента расхода сооружения.

Гидравлические лабораторные исследования проводились на пространственной модели сооружения в масштабе 1:2, 1:3. Методологическими опытами было установлено, что на пропускную способность и устойчивость гидравлического режима значительное влияние оказывают форма и

геометрические размеры входной части стабилизатора уровня воды. Опыты показали, что при отсутствии входной воронки на цилиндрическом стабилизаторе условия формирования напорного гидравлического режима в сооружении значительно ухудшаются, возрастает коэффициент сопротивления потока на входе  $\xi_B$ , наблюдается явление воронкообразования с прорывом воздуха в нижний бьеф. В результате этих явлений снижается пропускная способность сооружений, происходит раскачка потока в нижнем бьефе и размыв отводящего русла канала. Кроме того, было установлено, что наиболее приемлемой формой входной воронки является коническая форма.

В результате этого определились дополнительные задачи исследований по определению оптимальных размеров входной воронки, обеспечивающих работу сооружения с устойчивым напорным режимом при минимальных значениях глубины воды на входе  $H$  и исключающие раскачку воды в нижнем бьефе.

При работе сооружения в пусковой период или в первоначальный момент после срабатывания затвора (погружение цилиндрического затвора) пропускная способность сооружения определяется пропускной способностью входной воронки стабилизатора и рассчитывается по формулам расхода для кругового водослива. Водопроводящая труба в этом случае работает безнапорно. При погружении затвора (уровень воды над воронкой увеличивается) происходит плавная смена безнапорного режима на напорный через полупапорный, характерной особенностью которого является захват воздуха через вихревую воронку на входе и транспортировка его по трубе в нижний бьеф. Исходя из описанной картины работы сооружения, в качестве критерия устойчивости напорного гидравлического режима считаем необходимым определение минимального значения глубины над входной воронкой  $H$ , при которой вихревая воронка исчезает, и сооружение начинает работать в устойчивом напорном режиме. Для опреде-

ления минимально допустимой глубины воды на входе, обеспечивающей напорный режим в типовых трубчатых быстотоках, в донных отверстиях – водовыпусках имеются расчетные зависимости [1-3], которые учитывают конструктивные особенности входной части сооружений и величину пропускаемого расхода. Использование этих рекомендаций, как показали опыты, для исследованной конструкции сооружений является неприемлемыми.

В результате анализа литературных данных и проведения методологических опытов было установлено, что величины  $H$  и  $\xi_B$  являются функциями гидравлических и геометрических параметров (факторов) (1), (2):

$$\xi_B = f(F_r, \varphi, \frac{l}{d}), \quad (1)$$

$$H = f(F_r, \varphi, \frac{l}{d}), \quad (2)$$

где  $F_r = \frac{V^2}{qd}$  – число Фруда на входе в трубу сооружения диаметром  $d$ ;

$\varphi$  – угол наклона образующей входной воронки затвора к горизонту;

$\frac{l}{d}$  – относительная длина образующей входной воронки.

Установление расчетных зависимостей  $\xi_B$  и  $H$  производилось опытным путем с применением методов теории математического планирования эксперимента [4]. Был использован трехуровневый план второго порядка Бокса-Бенкина [5] для трехфакторного эксперимента. В соответствии с планом в таблице 1 приведены условия кодирования и пределы варьирования переменных  $F_r$ ,  $\varphi$ ,  $\frac{l}{d}$ .

Верхний и нижний уровни переменных  $\varphi$ ,  $\frac{l}{d}$  были назначены по конструктивным соображениям, а значения чисел  $F_r$  по гидравлическим характеристикам сооружений в натуре.

**Таблица 1 – Условия кодирования и пределы варьирования переменных**

| Переменные (код)                    | $F_r, (X_1)$ | $\phi^0, (X_2)$ | $\frac{1}{d}, (X_3)$ |
|-------------------------------------|--------------|-----------------|----------------------|
| Основной уровень, $X_{0i}$          | 2,16         | 45              | 0,80                 |
| Интервал варьирования, $\Delta X_i$ | 1,55         | 39              | 0,53                 |
| Верхний уровень +1                  | 3,71         | 84              | 1,33                 |
| Нижний уровень -1                   | 0,61         | 6               | 0,27                 |

Методика подсчета коэффициента гидравлического сопротивления входной воронки затвора при работе сооружения в расчетном (напорном) гидравлическом режиме для каждого опыта заключалась в следующем:

- по опытным данным определялся коэффициент расхода сооружения с воронкой по формуле (3):

$$\mu_{c1} = \frac{Q}{\omega \sqrt{2qZ_1}}, \quad (3)$$

где  $Q$  – расход, пропускаемый через сооружение;

$\omega$  – площадь поперечного сечения водопроводящей трубы;

$Z_1$  – гидравлический перепад (разница уровней воды между верхним и нижним бьефом) для сооружения с воронкой на входе.

С другой стороны, коэффициент расхода определялся по формуле (4):

$$\mu_{c1} = \frac{1}{\sqrt{\xi_B + \sum \xi}}, \quad (4)$$

где  $\sum \xi$  – сумма коэффициентов гидравлических сопротивлений по длине вертикальной шахты, на поворот, по длине водопроводящей трубы и на выход.

- входная воронка убиралась, и вход выполнялся по типу острой кромки, а величина коэффициента сопротивления на вход в расчетах принималась по «Справочнику по гидравлическим расчетам» [1] равная  $\xi_B = 0,5$ . По опытным данным подсчитывался коэффициент расхода

$$\mu_{c2} = \frac{Q}{\omega \sqrt{2qZ_2}}, \quad (5)$$

где  $Z_2$  – гидравлический перепад для сооружений без воронки на входе.

В то же время:

$$\mu_{c2} = \frac{1}{\sqrt{0,5 + \sum \xi}}.$$

Решая совместно уравнения (4) и (5), получим выражение (6) для подсчета коэффициента сопротивления на вход в сооружение с воронкой:

$$\xi_B = \frac{1}{\mu_{c1}^2} - \frac{1}{\mu_{c2}^2} + 0,5. \quad (6)$$

Порядок проведения опытов по изучению условий зарядки сооружений в напорный режим был следующий. Для заданного опытного расхода достигался устойчивый напорный режим в сооружении при полностью погруженном затворе за счет увеличения глубины в нижнем бьефе или за счет прикрытия выходного сечения водопроводящей трубы. В опыте измерялось минимальное значение глубины  $H$  над входной воронкой, при малейшем уменьшении которой происходил захват воздуха в трубу через возникающую вихревую воронку. Эксперименты по определению  $H$  и  $\xi_B$  проводились по матрице трехуровневого плана Бокса-Бенкина. Матрица плана и опытные данные приведены в таблице 2.

В результате обработки опытных данных по имеющимся методикам [4-6], которые выполнялись на ЭВМ, получены уравнения (7), (8) в кодированном виде:

$$\frac{H}{d} = 2 + 0,33X_1 - 0,34X_2 - 0,13X_3 + 0,04X_1^2 - 0,22X_2^2 - 0,32X_3^2 - 0,15X_2X_3, \quad (7)$$

$$\xi_B = 0,43 - 0,11X_1 + 0,12X_2 + 0,16X_1^2 + 0,18X_2^2 - 0,013X_3^2 + 0,02X_1X_2 - 0,06X_1X_3 - 0,06X_2^3. \quad (8)$$

**Таблица 2 – Матрица трехуровневого плана второго порядка Бокса-Бенкина и опытные данные**

по определению  $\frac{H}{d}$  и  $\xi_B$

| № опыта | План  |       |       | Значение факторов |             |               | Условия работы и опытные данные |           |                       |                         | $\hat{Y}_{1j}$  | $\hat{Y}_{2j}$  |
|---------|-------|-------|-------|-------------------|-------------|---------------|---------------------------------|-----------|-----------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
|         | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $F_r$             | $\varphi^0$ | $\frac{l}{d}$ | гидравлический режим            | $Q$ , л/с | $Y_{1j}$<br>( $H/d$ ) | $Y_{2j}$<br>( $\xi_B$ ) |                 |                 |
| 1       | +1    | +1    | 0     | 3,71              | 84          | 0,80          | напорный                        | 23,5      | 1,95                  | 0,88                    | 1,81            | 0,80            |
| 2       | +1    | -1    | 0     | 3,71              | 6           | 0,80          | -                               | 23,5      | 2,40                  | 0,49                    | 2,49            | 0,52            |
| 3       | -1    | +1    | 0     | 0,61              | 84          | 0,80          | -                               | 9,46      | 1,29                  | 1,0                     | 1,15            | 0,98            |
| 4       | -1    | -1    | 0     | 0,61              | 6           | 0,80          | -                               | 9,46      | 1,63                  | 0,69                    | 1,83            | 0,78            |
| 5       | 0     | 0     | 0     | 2,16              | 45          | 0,80          | -                               | 17,8      | 1,93                  | 0,44                    | 2,00            | 0,43            |
| 6       | +1    | 0     | +1    | 3,71              | 45          | 1,33          | -                               | 23,5      | 1,87                  | 0,43                    | 1,92            | 0,41            |
| 7       | +1    | 0     | -1    | 3,71              | 45          | 0,27          | -                               | 23,5      | 2,17                  | 0,44                    | 2,18            | 0,52            |
| 8       | -1    | 0     | +1    | 0,61              | 45          | 1,33          | -                               | 9,46      | 1,23                  | 0,83                    | 1,26            | 0,75            |
| 9       | -1    | 0     | -1    | 0,61              | 45          | 0,27          | -                               | 9,46      | 1,62                  | 0,60                    | 1,52            | 0,3             |
| 10      | 0     | 0     | 0     | 2,16              | 45          | 0,80          | -                               | 17,8      | 2,01                  | 0,42                    | 2,00            | 0,43            |
| 11      | 0     | +1    | +1    | 2,16              | 84          | 1,33          | -                               | 17,8      | 0,74                  | 0,54                    | 0,84            | 0,65            |
| 12      | 0     | +1    | -1    | 2,16              | 84          | 0,27          | -                               | 17,8      | 1,22                  | 0,74                    | 1,39            | 0,78            |
| 13      | 0     | -1    | +1    | 2,16              | 6           | 1,33          | -                               | 17,8      | 2,01                  | 0,54                    | 1,82            | 0,54            |
| 14      | 0     | -1    | -1    | 2,16              | 6           | 0,27          | -                               | 17,8      | 1,88                  | 0,54                    | 1,78            | 0,46            |
| 15      | 0     | 0     | 0     | 2,16              | 45          | 0,80          | -                               | 17,8      | 1,93                  | 0,43                    | 2,00            | 0,43            |
|         |       |       |       |                   |             |               |                                 |           |                       |                         | $\Sigma = 26,0$ | $\Sigma = 9,12$ |

Величина ошибки экспериментальных данных, вычисленная по результатам трех параллельных опытов в центре плана (опыты 5, 10, 15), составила

$$\text{для } y_1 = \frac{H}{d}, \quad S_3 = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_0} (y_{0i} - \bar{y})^2}}{n_0 - 1} = 0,03,$$

$$\text{для } y_2 = \xi_B, \quad S_3 = 0,01,$$

что позволяет сделать вывод о высокой точности эксперимента.

Переходя от кодированных к натуральным значениям переменных, получены в окончательном виде расчетные уравнения (9), (10) для определения относительной (в долях от диаметра водопроводящей трубы сооружения) минимально допустимой глубины воды на входе, обеспечивающей работу сооружения в напорном гидравлическом режиме, и коэффициента гидравлического сопротивления на вход в воронку стабилизатора уровня:

$$\frac{H}{d} = (67,6 + 14Fr + 0,98\varphi + 167\frac{l}{d} + 1,7Fr^2 - 0,01\varphi^2 - 114\frac{l^2}{d^2} - 0,20\frac{l}{d}\varphi)10^{-2}, \quad (9)$$

$$\xi_B = (6,7Fr^2 + 0,012\varphi^2 - 4,6\frac{l^2}{d_2} - 37,5Fr - 0,59\varphi + 20,5\frac{l}{d} - 0,03Fr\varphi - 0,29\frac{l}{d}\varphi - 0,89)10^{-2}, \quad (10)$$

где  $\varphi$  – угол наклона образующей входной воронки в градусах.

Дисперсия неадекватности полученных расчетных зависимостей определилась равной

$$\text{для } y_1 = \frac{H}{d}, \quad S_{на}^2 = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{1i} - \bar{y}_{1i})^2}}{n} = 0,0143,$$

$$\text{то же для } y_2 = \xi_B; \quad S_{на}^2 = 0,004.$$

Таким образом, среднеквадратичное отклонение или стандарт для  $\frac{H}{d}$  и  $\xi_B$  составляет:

$$\sigma_x = \sqrt{S_{на}^2} = 0,12, \text{ а для } \xi_B \text{ параметр } \sigma_x = 0,063.$$

Для осуществления анализа полученных уравнений в графическом виде расчетные уравнения в кодированном виде преобразованы к канонической форме:

$$\text{для } y_1 = \frac{H}{d},$$

$$\text{при } X_1 = +1, \quad y_{1i} = -0,365Z_2^2 - 0,176Z_3^2 + 2,5 \quad (11)$$

$$\text{при } X_1 = -1, \quad y_{1i} = 1,84 - 0,364Z_2^2 - 0,176Z_3^2; \quad (12)$$

$$\text{для } y_2 = \xi_B,$$

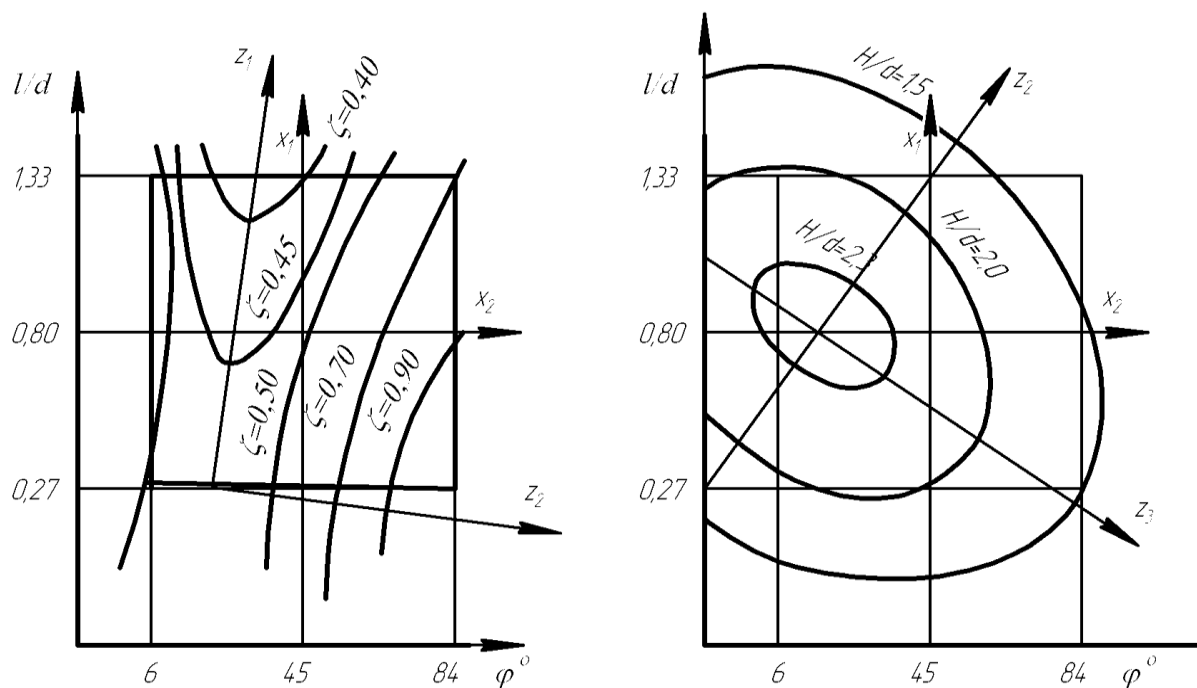
$$\text{при } X_1 = +1, \quad y_{2i} = 0,184Z_2^2 - 0,018Z_3^2, \quad (13)$$

$$\text{при } X_1 = -1, \quad y_{2i} = 0,184Z_2^2 - 0,018Z_3^2 + 0,7, \quad (14)$$

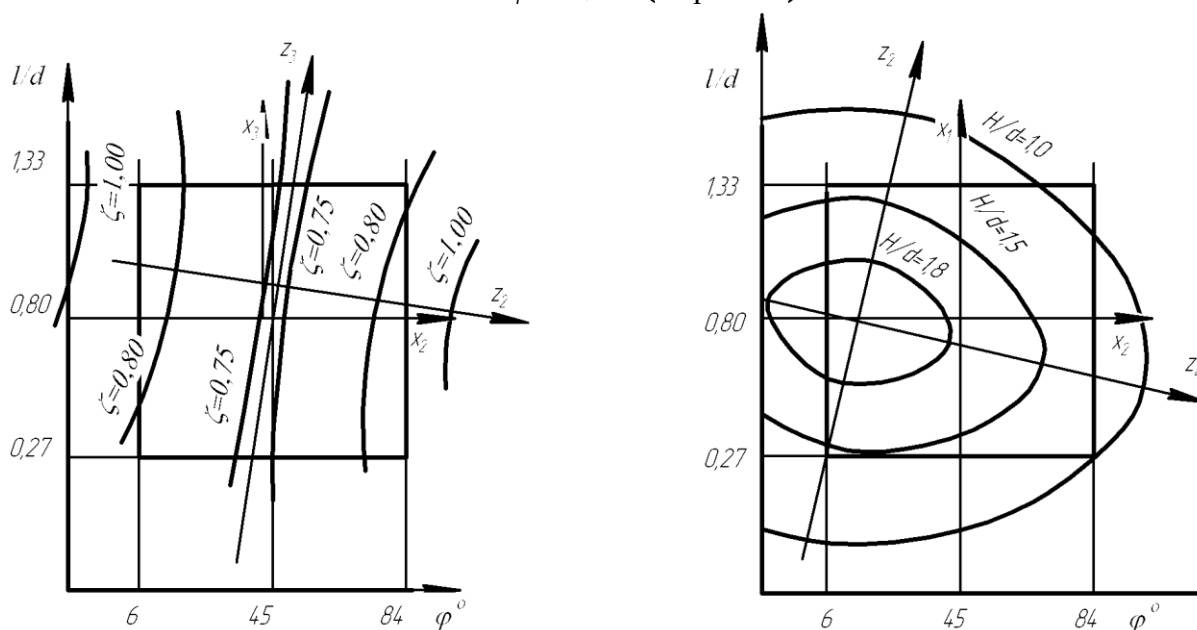
где  $Z_2$  и  $Z_3$  – текущие координаты для  $y_1 = \frac{H}{d}$  и  $y_2 = \xi_B$  канонических уравнений (соответствующие  $X_2$  и  $X_3$ ) для новых осей координат в исследуемом факторном пространстве.

По каноническим уравнениям построены геометрические образы исследуемой поверхности отклика для  $X_1 = +1$  и  $X_1 = -1$  в виде проекций на факторную плоскость линий равных значений  $y_{1i}$  и  $y_{2i}$  (рисунки 2, 3).

Анализ полученных уравнений, геометрических образов поверхностей отклика показывает, что с гидравлической точки зрения (наименьшее значение глубины воды на входе  $H$ , достаточно высокий коэффициент расхода  $\mu_c$ ) более совершенной является входная часть по типу воронки при относительной длине образующей  $\frac{l}{d} \approx 0,33$  и угле ее наклона к вертикали  $\varphi = 84^\circ$ .



**Рисунок 2 – Геометрические образы исследуемой поверхности отклика для  $F_r = 3,71$  ( $X_1 = +1$ )**



**Рисунок 3 – Геометрические образы исследуемой поверхности отклика для  $F_r = 0,61$  ( $X_1 = -1$ )**

Дальнейшие гидравлические исследования сооружения проводились с рекомендованными размерами входной воронки: при относительной длине образующей воронки  $\frac{l}{d} = 0,33$  и угле наклона  $\varphi = 84^\circ$ .

Результаты изучения пропускной способности трубчатого водовыпуска, оборудованного стабилизатором уровня воды, при работе в напорном гидравлическом режиме приведены в таблице 3.

**Таблица 3 – Результаты изучения пропускной способности трубчатого водовыпуска, оборудованного стабилизатором уровня воды (масштаб модели М 1:2)**

| № опыта | Расход $Q$ , л/с |        | Гидравлический перепад $Z$ , м |        | $\mu_c$ |
|---------|------------------|--------|--------------------------------|--------|---------|
|         | модель           | натура | модель                         | натура |         |
| 1       | 16,8             | 95     | 0,1                            | 0,2    | 0,675   |
| 2       | 23,9             | 135    | 0,2                            | 0,4    | 0,678   |
| 3       | 29,2             | 165    | 0,3                            | 0,6    | 0,679   |
| 4       | 33,9             | 192    | 0,4                            | 0,8    | 0,681   |

По данным таблицы величина коэффициента расхода сооружения со стабилизатором уровня воды в диапазоне исследованных гидравлических параметров практически не изменяется и может быть принята постоянной, равной  $\mu_c = 0,68$ .

Натурные исследования, проведенные на орошаемом участке в Теучежском районе, показали, что стабилизатор уровня воды надежен в работе, прост в эксплуатации, точность поддержания уровня воды  $\pm 2$  см.

### **Выводы.**

1 Опыты показали, что при отсутствии конической входной воронки на стабилизаторе уровня воды условия формирования напорного гидравлического режима в сооружении значительно ухудшаются, увеличивается коэффициент сопротивления потока на входе, и даже при значительных глубинах на входе наблюдается явление воронкообразования с прорывом воздуха в нижний бьеф, что вызывает раскачку воды в нижнем бьефе и размыв отводящего русла канала.

2 Для практики рекомендуются следующие размеры входной воронки стабилизатора уровня воды:

$$\frac{l}{d} = 0,33, \quad \varphi = 84^\circ.$$

3 Результаты исследования условий формирования напорного гидравлического режима, данные о пропускной способности, позволяют при проектировании определять минимально допустимую глубину воды  $H$  над входным оголовком, необходимую для правильной привязки сооружений на сети.

4 Кроме того, результаты исследований показали, что включение сооружения в работу напорным гидравлическим режимом при минимальной глубине  $H$  над входной воронкой не зависит от глубины воды в нижнем бьефе и наличия затопления выходного сечения трубы.

### **Список использованных источников**

1 Кисилев, П. Г. Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Кисилев. – М.: Энергия, 1974. – 312 с.

2 Альтштуль, А. Д. Влияние вихревых воронок на коэффициент расхода при истечении жидкости из отверстий / А. Д. Альтштуль, М. Ш. Марголин // Гидротехническое строительство. – 1968. – № 6. – С. 15.

3 Костин, А. И. К вопросу обеспечения устойчивого напорного режима в гидротехнических трубчатых сооружениях / А. И. Костин, М. М. Скиба: сб. науч. тр. / НИМИ. – Новочеркасск, 1959. – Т. 64. – С. 45-53.

4 Налимов, В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 326 с.

5 Behnken, D. W. A class of three leveled second order designs for surface fitting. – Stat. Techn. Res. Group Techn. Rept., Princeton Univ., 1958. – № 26.

6 Маркова, Е. В. Планирование эксперимента в условиях неоднородностей / Е. В. Маркова, А. Н. Лисенков. – М.: Наука, 1973. – 215 с.